

# Etude expérimentale des échanges thermiques associés à un calorimètre non adiabatique différentiel dédié à la mesure des échauffements nucléaires en réacteur de recherche d'irradiation.

Julie BRUN<sup>1\*</sup>, Cédric DE VITA<sup>1</sup>, Christelle REYNARD-CARETTE<sup>1</sup>, Abdallah LYOUSSI<sup>2</sup>, Michel CARETTE<sup>1</sup>, Magali MURAGLIA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Aix-Marseille Université, LISA EA 4672, 13397 cedex 20, MARSEILLE France

<sup>2</sup>CEA, Direction de l'Energie Nucléaire, Département d'Etudes des Réacteurs, Centre de Cadarache, 13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France.

\* auteur correspondant : [julie.brun1@etu.univ-amu.fr](mailto:julie.brun1@etu.univ-amu.fr)

**Résumé** - L'échauffement nucléaire, paramètre clé pour le dimensionnement thermique des expériences sur les matériaux et les combustibles dans les canaux expérimentaux du futur réacteur d'irradiation (le Réacteur Jules Horowitz), est mesuré en pile par des calorimètres radiométriques différentiels non adiabatiques. L'étalonnage de ce type de capteur est effectué préliminairement hors flux nucléaires en provoquant un échauffement par effet Joule. Ce papier présente l'influence de la température du fluide caloporteur sur la courbe de calibration d'une cellule calorimétrique instrumentée (fluxmètres, thermocouples). Une interprétation de son comportement thermique est donnée à partir des transferts thermiques et des profils de température mesurés.

Nomenclature

$H$	hauteur, $m$	<i>Indices et exposants</i>	
$P$	puissance électrique, $W$	$f$	fluide caloporteur
$R$	rayon, $m$	$s$	socle
$Re$	nombre de Reynolds	$p$	pied
$T$	température, $^{\circ}C$		
$V$	vitesse, $m.s^{-1}$		

## 1. Contexte et objectifs

La quantification de l'échauffement nucléaire, exprimé en W/g, est nécessaire dans le domaine de la fission nucléaire à différentes étapes de la vie d'un réacteur de recherche d'irradiation. Elle intervient notamment dans la définition d'éléments spécifiques intégrés dans les dispositifs expérimentaux mis en pile dans les canaux d'expérimentation. En particulier dans celle des éléments [1] (choix des matériaux et des isolants, dimensionnement d'éléments chauffants et de four, assemblage) qui permettent d'imposer des conditions thermiques (température et gradient de température) précises lors des études scientifiques avancées sur le vieillissement accéléré des matériaux et sur le comportement du combustible nucléaire sous irradiation. La maîtrise de ces conditions expérimentales est importante dans le cadre de la compréhension et de la connaissance de différents phénomènes mis en jeu (transition ductile/fragile, cinétique de relâchement de gaz, changement de phase, ...).

La quantification de ce paramètre clé est actuellement effectuée de façon directe dans les réacteurs de recherche de type MTR (Material Testing Reactor) par deux techniques de mesure : les calorimètres radiométriques [2-4] et les thermomètres gamma [5]. Avec la construction du nouveau réacteur de ce type (le réacteur Jules Horowitz, RJH, basé sur Cadarache) qui permettra de tester simultanément un nombre important d'expériences

(jusqu'à une vingtaine) sous de nouvelles conditions plus sévères [6] (flux neutronique rapide plus intense, déplacement par atome conséquent, échauffement nucléaire plus grand), l'instrumentation nucléaire utilisée en ligne et donc celle relative à la mesure d'échauffement nucléaire doit être adaptée et optimisée. En effet, l'échauffement nucléaire va pouvoir atteindre, dans des conditions nominales à pleine puissance du réacteur RJH (100MW), une valeur de plus de 20W/g en cœur contre seulement 13W/g pour le réacteur français OSIRIS (basé sur Saclay et construit dans les années 70). C'est dans ce contexte que sont réalisés les travaux présentés dans ce papier. Plus précisément ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'un programme de recherche commun, entre le CEA et l'Université d'Aix-Marseille, s'intitulant INCORE « Instrumentation for Nuclear radiations and Calorimetry Online in Reactor ». L'objectif de ce programme est d'améliorer in fine la quantification de l'échauffement nucléaire au sein des canaux expérimentaux du réacteur Jules Horowitz, dès son démarrage, à partir de deux nouveaux moyens expérimentaux exploités soit en milieu irradié, soit en milieu non irradié [7] : le dispositif CARMEN et le banc d'essais ThermoHYdrauliques BETHY. Le dispositif CARMEN intégrera différents capteurs et détecteurs dont un calorimètre et fournira une cartographie en ligne des conditions expérimentales (neutroniques, photoniques et thermiques) des canaux expérimentaux du cœur et du réflecteur du RJH. Le banc BETHY servira à qualifier différents calorimètres dans des conditions thermiques et hydrauliques, hors flux nucléaires, similaires à celles présentées dans un canal d'expérimentation en cœur du réacteur RJH. L'objectif de ces travaux en milieu non irradié est de comprendre le comportement thermique de ce type de capteur pour différentes sollicitations externes dans différents scénarios afin de l'optimiser, de le miniaturiser et d'améliorer sa calibration. Préliminairement à la réception de ce banc, un dispositif ouvert et modulaire compatible avec la mise en place « facile » d'instrumentation et de méthodes de mesure a été développé. Celui-ci a été exploité pour étudier une configuration calorimétrique utilisée dans OSIRIS [8] puis pour caractériser une nouvelle configuration déduite de travaux de modélisation en thermique [9-10] par méthode par éléments finis. Ce papier présente l'étude de l'influence de la température du fluide caloporteur sur la réponse de cette nouvelle configuration calorimétrique plus sensible dans le cas d'une simulation de l'échauffement nucléaire localisé sur un échantillon de graphite en milieu non irradié.

## **2. Dispositif expérimental**

Ce paragraphe est consacré à la présentation du dispositif préliminaire ouvert et modulaire qui a été mis en œuvre afin de soumettre des cellules calorimétriques fortement instrumentées à de premières conditions thermiques et fluidiques particulières dans le cas d'un scénario de calibration hors pile.

### **2.1. Présentation de la cellule calorimétrique instrumentée**

La cellule instrumentée comprend une cellule calorimétrique et une enveloppe instrumentée.

La cellule calorimétrique correspond à l'une des deux cellules d'un calorimètre différentiel non adiabatique, déjà décrit en détail précédemment [2, 8, 9] : la cellule de mesure avec échantillon de graphite. Cette cellule est constituée de trois parties en aluminium : la tête contenant l'échantillon de graphite et un élément chauffant pour la calibration, un piédestal transférant l'énergie vers le socle (la troisième partie) en contact avec l'enveloppe pour évacuer l'énergie vers l'extérieur. Cette cellule est par ailleurs instrumentée de 2 thermocouples de type K situés au niveau d'un point chaud (en haut du piédestal au centre) et au niveau d'un point froid (à mi hauteur en paroi externe).

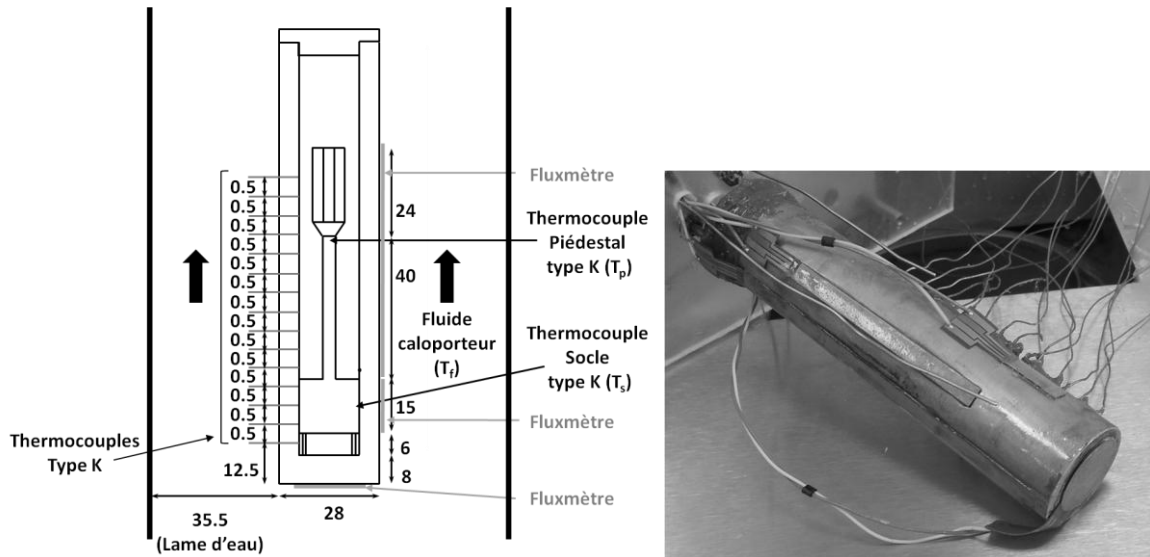


Figure 1 : Schéma (à gauche) et photo (à droite) de la cellule instrumentée

L'enveloppe accueillant cette cellule calorimétrique est une enveloppe cylindrique en laiton de 122,9 mm de hauteur, de 17 mm de diamètre interne, et de 28 mm de diamètre externe fermée par un isolant et remplie d'azote. Cette enveloppe est instrumentée par 15 thermocouples de type K de 0,5 mm de diamètre répartis verticalement avec un pas de 0,5 mm et traversant de façon étanche la paroi de l'enveloppe pour être affleurant à la paroi intérieure. Ces thermocouples sont utilisés pour déterminer un profil de température vertical. Cette enveloppe comporte également 6 fluxmètres thermiques (des fluxmètres matriciels à gradient tangentiel de flux, de faibles épaisseurs (environ  $420\mu\text{m}$ ) collés sur sa surface extérieure. Ces fluxmètres permettent de quantifier les transferts thermiques pariétaux dans certaines zones du calorimètre non adiabatique. Des résultats obtenus avec 2 fluxmètres rectangulaires (5 mm x 15 mm) de sensibilité quasi identique ( $0,526$  et  $0,565 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ) positionnés en face du socle de la cellule calorimétrique sont exploités dans ce papier.

## 2.2. Présentation du dispositif expérimental associé

A cette cellule instrumentée est associé un dispositif prémaquette.

Ce dispositif comprend :

- un bain thermostatique à débordement dans lequel est insérée la cellule instrumentée. Ce bain permet de simuler une veine de fluide caloporteur en écoulement ascensionnel régulée en température et en vitesse autour de la cellule instrumentée ;

- une alimentation électrique de laboratoire de marque Construction Electronique (ELC) et de type AL 781 NX possédant deux plages de distribution d'intensité en courant : 0-1A et 0-5A et une plage en tension réglable de 0 à 30V. Cette alimentation en courant est utilisée pour injecter de la puissance dans l'élément chauffant de la cellule calorimétrique pour simuler l'échauffement nucléaire par effet Joule ;

- un système d'acquisition connecté à un ordinateur. Ce système se compose d'une unité d'acquisition de données de type Agilent (34970A) accueillant différentes cartes d'acquisition 34901A (Multiplexeurs à armature à 20 voies) utilisées pour les mesures de températures, et pour les mesures de tension dans deux gammes : une gamme de tension de +/- 100mV pour les fluxmètres et une gamme +/- 10V pour la mesure localisée aux bornes de la résistance chauffante.

- 2 thermocouples de type K de 1 mm insérés dans la veine d'écoulement.

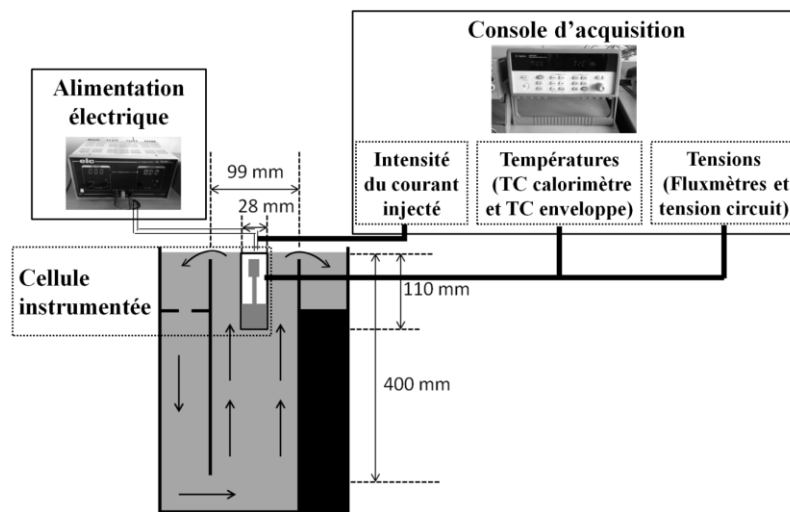


Figure 2 : Schéma du dispositif prémaquette

### 3. Résultats et discussion

Les résultats présentés dans ce paragraphe concernent une étude de la réponse et du comportement thermique de la cellule calorimétrique lors du protocole de calibration. Cette calibration a été effectuée en injectant des incréments de puissance électrique au sein de l'élément chauffant situé dans la tête au centre de l'échantillon de graphite ( $P < 7W$ ). L'influence de la vitesse et de la température du fluide caloporteur ont été déterminées. Les différentes puissances électriques injectées sont trop faibles pour constater une influence sur les températures atteintes au sein du calorimètre et donc sur la courbe de calibration du capteur dans la plage d'intensité d'écoulement forcé testée ( $557 < Re < 1608$ ). Par conséquent, ce papier porte uniquement sur l'influence de la température du fluide caloporteur pour une même vitesse d'écoulement ( $Re = 557$ ).

#### 3.1. Courbe de calibration et sensibilité de la cellule calorimétrique

La réponse du capteur est obtenue à partir des mesures de la température du point chaud au niveau du piédestal ( $T_p$ ) et de celle du point froid au niveau du socle ( $T_s$ ). Pour chaque puissance, la réponse du calorimètre non adiabatique permanent comporte deux phases : une phase transitoire (accumulation d'énergie avec échanges) suivie d'une phase stationnaire (équilibre thermique avec échanges). Les températures moyennes en régime stationnaire sont alors déterminées afin d'en déduire la courbe de réponse du capteur. Cette courbe de réponse ou courbe de calibration correspond à la différence de ces deux températures ( $T_p - T_s$ ) en fonction de la puissance électrique injectée. Cette courbe est présentée sur la figure 3 pour une température du fluide caloporteur de  $23^\circ C$  et montre que la réponse de la cellule calorimétrique n'est pas linéaire. Plus la puissance électrique augmente, et moins la différence de température croît.

Cette perte de linéarité de la réponse du capteur entraîne une variation de sa sensibilité sur la plage de puissance testée. Plus précisément, la forme quadratique de la courbe de calibration correspond à une décroissance linéaire de la sensibilité en fonction la puissance injectée.

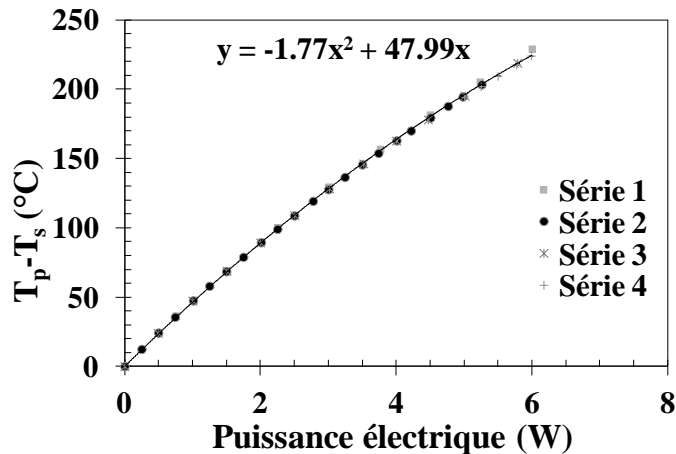


Figure 3 : Variation de la différence de température en fonction de la puissance électrique injectée ( $T_f=23^{\circ}\text{C}$ ,  $Re = 557$ ).

Ceci est dû à l'augmentation des températures dans le calorimètre et donc à une modification de la nature des transferts thermiques. En effet si l'on trace la sensibilité de la cellule calorimétrique en fonction de la température du point chaud au niveau du piédestal pour une température du fluide caloporteur de  $23^{\circ}\text{C}$ , on observe que la diminution de la sensibilité est accrue pour des températures supérieures à  $100^{\circ}\text{C}$  (cf. Figure 4). Le calorimètre est alors régi par des transferts conductifs et radiatifs.

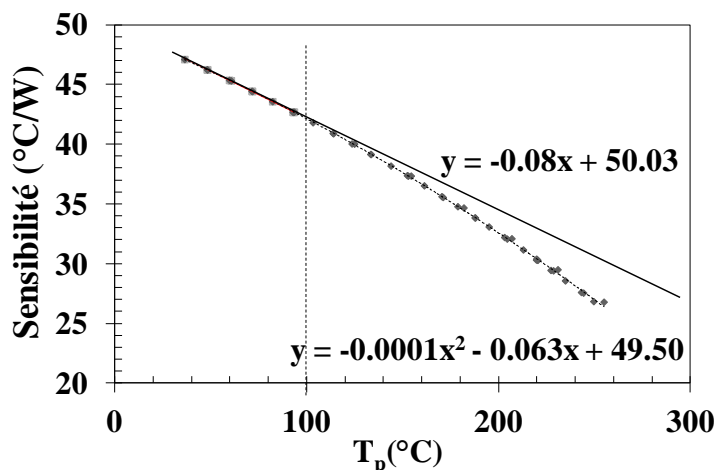


Figure 4 : Variation de la sensibilité en fonction de la température du piédestal.

### 3.2. Influence de la température du fluide caloporteur

Afin de déterminer l'influence de la température sur la réponse du calorimètre, une étude en fonction de la température du fluide caloporteur a été réalisée.

La figure 5 donne la réponse du capteur pour une température du fluide caloporteur comprise entre  $23^{\circ}\text{C}$  et  $73^{\circ}\text{C}$  pour un nombre de Reynolds de 557. Ces courbes montrent d'une part que la courbe de calibration est quadratique quelle que soit la température imposée. On observe d'autre part qu'une augmentation de la température du fluide caloporteur se traduit par une diminution de la réponse de la cellule calorimétrique.

Par exemple pour une puissance électrique de 4W lorsque la température du fluide caloporteur passe de  $23^{\circ}\text{C}$  à  $73^{\circ}\text{C}$ , la différence de température ( $T_p - T_s$ ) diminue de  $14^{\circ}\text{C}$  ( $164^{\circ}\text{C}$  contre  $150^{\circ}\text{C}$ ) et la sensibilité initialement de  $33,8^{\circ}\text{C/W}$  devient égale à  $31,6^{\circ}\text{C/W}$ .

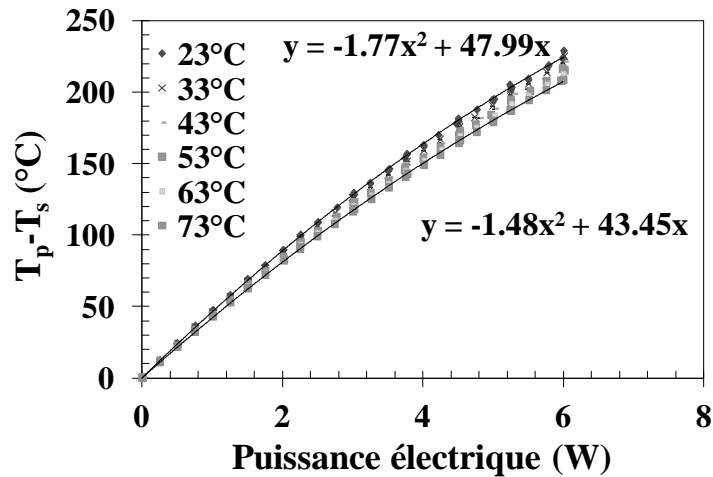


Figure 5 : Variation de la différence de température en fonction de la puissance électrique injectée pour différentes températures du fluide caloporteur.

Considérons la figure 6 qui donne l'évolution du profil axial de l'écart de température le long de la paroi interne de l'enveloppe de la cellule calorimétrique pour une puissance injectée de 3,75W. L'écart de température correspond à la différence entre la température à une côte donnée sur la paroi interne et la température du bain. Cette figure montre que plus la température du fluide caloporteur augmente, plus cet écart de température diminue dans la zone en face du socle et du piédestal alors qu'il augmente dans la zone en face de la tête. Ceci indique une intensification des transferts thermiques radiaux au niveau de la tête.

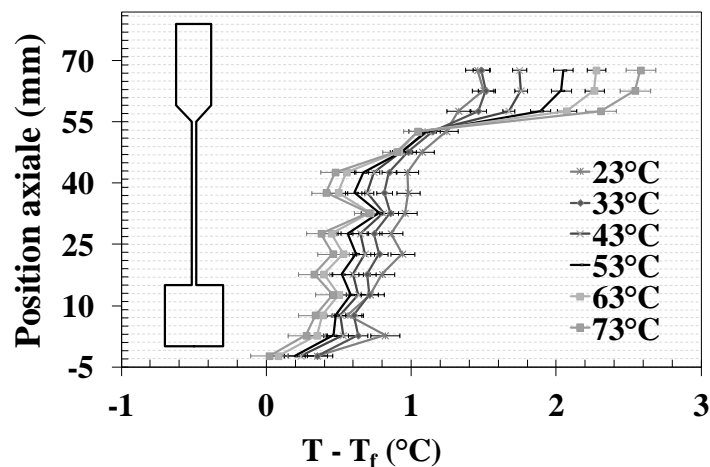


Figure 6 : Profil axial de température le long de la paroi interne de l'enveloppe pour une puissance de 3,75 W.

Ces transferts radiaux dans la cavité de gaz sont néfastes pour la réponse du capteur fondée sur «l'écoulement de chaleur» directionnel de la tête vers le socle. L'augmentation de ces transferts radiaux considérés comme des pertes thermiques entraîne alors une diminution de l'énergie utile évacuée par le socle et contribue donc à la diminution de la réponse du capteur observée à la figure 5.

Les transferts thermiques à travers la zone de l'enveloppe située en face du socle ont été quantifiés au moyen des 2 fluxmètres collés sur la paroi externe de l'enveloppe. La Figure 7 donne la puissance évacuée dans cette partie du calorimètre : puissance moyenne obtenue à partir des deux fluxmètres, en fonction de la plage de puissance électrique injectée et pour une température du fluide caloporteur comprise entre 23°C et 63°C.

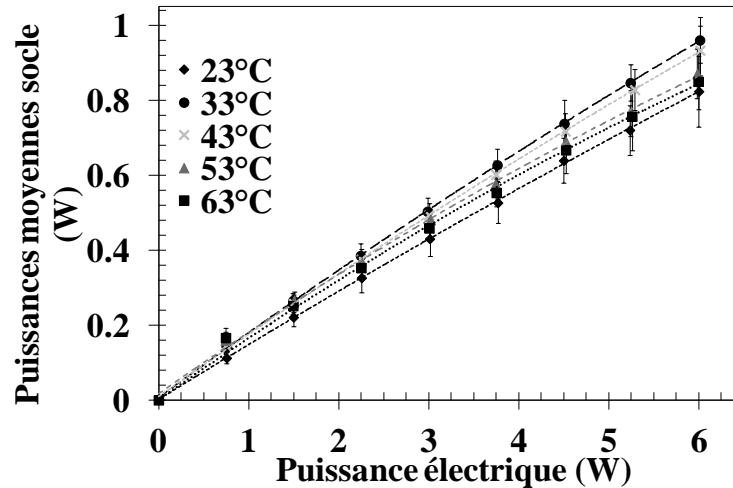


Figure 7 : Puissance évacuée par le socle en fonction de la puissance électrique pour différentes températures du fluide caloporteur.

Cette figure montre d'une part que pour une température de fluide caloporteur fixée, plus la puissance électrique imposée augmente plus cette puissance évacuée augmente. D'autre part, elle met en évidence que l'augmentation de cette puissance évacuée en fonction de la puissance électrique s'infléchit lorsque la puissance électrique est plus élevée. Ceci confirme que l'énergie évacuée au niveau du socle augmente de moins en moins en fonction de la puissance injectée et donc que les échanges s'intensifient au dessus du socle.

#### 4. Conclusions et perspectives

Une étude expérimentale portant sur la réponse d'une cellule calorimétrique correspondant à la cellule de mesure du calorimètre intégré dans le prototype du dispositif CARMEN a été conduite. Une enveloppe instrumentée associée à un dispositif préliminaire au banc BETHY a été développée afin de déterminer le profil axial de température en paroi interne de l'enveloppe et les échanges pariétaux durant la calibration de la cellule calorimétrique par effet Joule.

Une étude de l'influence de la température du fluide caloporteur sur la réponse de la cellule calorimétrique a été effectuée pour une gamme de puissance électrique allant jusqu'à 6W et une température du fluide caloporteur comprise entre 23°C et 73°C en régime laminaire ( $Re=557$ ).

La courbe de calibration de la cellule calorimétrique, représentant la différence de température entre les points chaud et froid en fonction de la puissance électrique, n'est pas linéaire (régression d'ordre 2). Ceci implique que la sensibilité de cette cellule calorimétrique n'est pas constante dans ces conditions de puissance électrique et de température. La sensibilité décroît en fonction de la puissance électrique appliquée.

Par ailleurs, plus la température du fluide caloporteur augmente, plus la réponse du calorimètre diminue. Cette détérioration de réponse a été interprétée grâce aux mesures locales de température et grâce à celles intégrales des flux thermiques. La réponse de la cellule calorimétrique est conditionnée par la nature des transferts thermiques au sein du calorimètre et par leur répartition. L'augmentation de la puissance et de la température du fluide caloporteur favorisent les transferts thermiques radiaux au sein et au voisinage de la cavité interne de gaz (conductifs et radiatifs), ce qui endommage la contribution des transferts axiaux de la tête vers le socle et donc la différence de température.

Cette étude va être poursuivie en étendant la localisation du dépôt d'énergie, actuellement réduit à la tête porte-échantillon, à la structure du calorimètre afin d'effectuer une calibration hors flux nucléaires plus représentative du dépôt global en canal d'expérimentation en réacteur. Cette étude sera alors conduite dans le nouveau banc d'essais BETHY réceptionné en fin d'année 2012 au laboratoire qui permettra de reproduire la géométrie et des conditions thermiques et hydrauliques d'un canal d'expérimentation du cœur du RJH [11].

## Références

- [1] F. Malouch, Development and Experimental Validation of a Calculation Scheme for Nuclear Heating Evaluation in the Core of the OSIRIS Material Testing Reactor, *Proc. Int. Symp. on Reactor Dosimetry (ISRDI4)*, 22-27 Mai 2011, Omni Mount Washington Resort, USA
- [2] H. Carcreff *et al.*, Development, Calibration and Experimental Results Obtained With an Innovative Calorimeter (CALMOS) for Nuclear Heating Measurements, *IEEE, Transactions on Nuclear Sciences*, Vol. 59, N°4, pp. 1369-1376, 2012
- [3] B.M Makgopa *et al.*, Simulation of the In-Core Calorimeter Experiment in the SAFARI-1 Reactor, *Proc. Int. Conf. of Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications*, Juin 2009, Marseille, France.
- [4] M. Varvayanni *et al.*, Evaluation of nuclear heating of small samples in a research reactor core, *Annals of Nuclear Energy* 35, pp. 1414 - 1420, 2008.
- [5] D. Fourmentel *et al.*, Nuclear Heating Measurements in Material Testing Reactor: a Comparison Between a Differential Calorimeter And a Gamma Thermometer, *IEEE, Transactions on Nuclear Sciences*; publication acceptée.
- [6] D. Iracane *et al.*, Jules Horowitz Reactor : a high performance material testing reactor, *C. R. Physique* 9, pp. 445-456, 2008.
- [7] A. Lyoussi *et al.*, Advanced methodology and instrumentation for accurate on line measurements of neutron, photon and nuclear heating parameters inside Jules Horowitz MTR Reactor, *Trans. of European Research Reactor Conference (RRFM 2012)*, 18 - 22 Mars 2012, République Tchèque, Prague.
- [8] J. Brun *et al.*, Numerical and experimental calibration of calorimetric sample cell dedicated to nuclear heating measurements, *IEEE, Transactions on Nuclear Sciences*, Volume: 59 , Issue: 6 , Part: 2, pp 3173 – 3179, 2012.
- [9] C. Reynard-Carette *et al.*, Heat transfers associated to a non adiabatic differential calorimeter for nuclear heating measurements inside an experimental channel of the Jules Horowitz Reactor, *Proc. Eurotherm 2012, Septembre 2012, Poitiers, France*.
- [10] O. Merroun *et al.*, Heat transfer in a non adiabatic calorimeter: Numerical parametric study without or with nuclear heating deposit, *Proc. 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (2011) Toronto, Canada*.
- [11] C. De Vita *et al.*, Qualification d'un nouveau banc d'Essais ThermoHYdrauliques (BETHY) dédié à l'étalonnage de calorimètres radiométriques en conditions non irradiées, *Congrès annuel de la Société Française de Thermique, SFT 2013, 28 au 31 mai 2013, Gérardmer, France (communication par affiche acceptée)*.